

# 轮毂组合抽吸对旋转冲压压缩转子性能的影响

韩吉昂, 薛嘉麒, 钟兢军, 管 健

(大连海事大学 轮机工程学院 辽宁 大连 116026)

**摘 要:**为改善旋转冲压压缩转子通道内的流场结构,提升旋转冲压压缩转子的气动性能,采用 Fluent 软件对 3 种不同轮毂组合抽吸方式下的旋转冲压压缩转子流场进行了数值模拟,分析了各方案下旋转冲压压缩转子的总体性能以及内部流动特征,并探讨了抽吸流量对旋转冲压压缩转子性能的影响。结果表明:3 种抽吸组合均能实现效率或压比的提高,在方案 2 中,左隔板附近激波强度有所提高,且激波数目增加,转子承压能力提升,其压比提高了 5.2%;方案 3 中,旋转冲压压缩转子流道内附面层分离得到有效控制,在压比几乎不变的情况下,效率提升了 1.1%;改变抽吸流量会对旋转冲压压缩转子的流场及性能产生一定的影响,效果不明显。

**关 键 词:**旋转冲压压缩转子;组合抽吸;性能;数值模拟

中图分类号:V231.3 文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndjgc.2016.12.007

## 引 言

旋转冲压压缩转子是由美国 Ramgen 动力系统公司首先提出的一种新型压缩系统<sup>[1]</sup>,预期具有单级压比高、结构简单等优点,在能源动力装置中有着广泛的潜在应用前景;随后,美国 Ramgen 动力系统公司开展了这种新型压缩系统样机的设计、应用研究、波系配置和高压比旋转冲压压缩转子的设计等相关研究工作<sup>[2~6]</sup>;此外,Ramgen 动力系统公司还提出未来将从流动控制等方面着手开展相应研究工作,以进一步提高旋转冲压压缩转子的性能。

近年来,国内在旋转冲压压缩转子方面也开展了卓有成效的研究工作。中科院工程热物理研究所开展了内压式冲压叶轮二维叶栅设计和激波管风洞实验<sup>[7~8]</sup>,以及来流气流角对冲压叶栅的影响研究<sup>[9]</sup>。哈尔滨工业大学先后开展了旋转冲压发动机进气道压比特性研究<sup>[10]</sup>,以及转子偏心、背压脉动和转子涡动对旋转冲压转子进气道流场分布、激

励特性和起动的性能影响研究<sup>[11~12]</sup>。大连海事大学船舶动力工程研究所在旋转冲压压缩转子方面也开展了较为系统的研究,相继完成了旋转冲压压缩转子气动设计<sup>[13]</sup>,内部流场细节分析<sup>[14~15]</sup>,隔板顶部间隙尺寸以及关键几何参数对旋转冲压压缩转子流场与性能的影响研究等<sup>[16~18]</sup>。同时,也总结了旋转冲压压缩转子研究中需要解决的技术难点<sup>[19]</sup>。

旋转冲压压缩转子的工作原理决定了其进气流道内必然存在较大范围的流动分离现象,这会导致旋转冲压压缩转子性能的降低。因此,为了提高旋转冲压压缩转子的性能,有效控制其内部流动分离是一个关键。在众多的流动控制技术中,附面层抽吸技术是一种相对成熟和有效的流动分离控制技术。Ramgen 动力系统公司在旋转冲压压缩转子设计和试验研究中均引入了附面层抽吸技术,但由于保密的原因,其公开发表的文献中并没有给出附面层抽吸位置和抽吸流量等抽吸参数,也没有探讨附面层抽吸对旋转冲压压缩转子流场及性能的影响规律。

中科院工程热物理研究所在其提出的内压式冲压叶轮的轮毂和冲压叶栅叶片吸力面开展了附面层抽吸研究<sup>[20~21]</sup>,结果表明:轮毂抽吸措施可有效改善角区流动,抽吸位置在分离起始位置时,效果最好在 0.5% 抽吸率下,效率提高 4%,压比提高 20%;采取吸力面抽吸可以提高冲压叶栅的增压能力,在喉口之前抽吸增强了缝后激波的强度,而在喉口后抽吸则扩大了叶栅扩张段的流通面积,使结尾激波后移,这都有利于压比提升,并且抽吸流量相同时,在喉口附近位置抽吸总能达到最佳效果。大连海事大学船舶动力工程研究所也针对旋转冲压压缩转子开展了轮毂抽吸位置和抽吸流量的研究<sup>[22]</sup>,研究结果表明:在不同位置抽吸时匹配合适的抽吸流量可以有效提高旋转冲压压缩转子压比和效率。

收稿日期:2016-03-01; 修订日期:2016-09-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51406022);辽宁省自然科学基金资助项目(2013020129);辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2013199);辽宁省高校创新团队支持计划资助项目(LT2015004)

作者简介:韩吉昂(1979-),男,河南襄城人,大连海事大学副教授,博导。

从目前收集到的文献来看,有关旋转冲压压缩转子中附面层抽吸控制流动分离进而提高其性能的研究非常少(仅有以上提到的几篇文献),并且已有的研究都只考虑了单一位置抽吸的影响,而没有考虑不同位置组合抽吸的影响,还需要进一步深入的研究。

正是基于以上考虑,本文在课题组前期研究工作的基础上,开展了旋转冲压压缩转子轮毂组合抽吸研究,分析了不同组合抽吸方式和不同抽吸量对旋转冲压压缩转子性能的影响,以期能够实现进一步提高旋转冲压压缩转子总体性能的目的。

### 1 计算模型和数值方法

#### 1.1 计算模型

本文数值模拟采用的旋转冲压压缩转子计算模型轮缘进气流道数目为 3 个,如图 1 所示,其详细无量纲几何参数如表 1 所示。

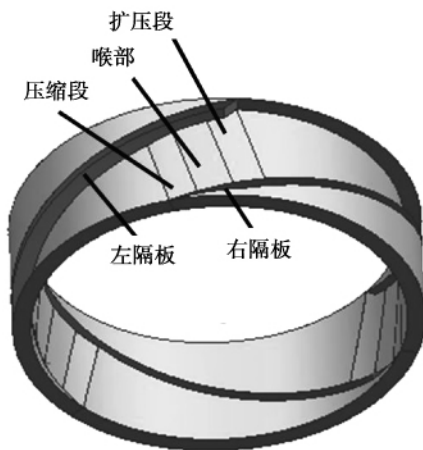


图 1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

表 1 旋转冲压压缩转子无量纲尺寸参数  
Tab. 1 Dimensionless geometrical parameters of the ram-rotor

几何参数	数值
压缩角	7.2
扩压角	6
隔板安装角	18
隔板高度	21
外径	420
内径	378

针对旋转冲压压缩转子的分离情况,主要在转子轮毂面上的 3 个位置布置了抽吸缝,缝的宽度均为 2 mm,通过不同缝之间的开闭组合,来探讨轮毂面组合抽吸对旋转冲压压缩转子流场和性能的影响。图 2 给出了旋转冲压压缩转子轮毂面上的开缝位置,其中抽吸缝 1 位于喉部分离泡的起始位置,沿分离线斜开,约占 60% 节距长度,抽吸缝 2 位于左侧隔板的分离线上,其流向长度为喉部长度的 88%,抽吸缝 3 则位于喉部出口处分离线的位置,其长度为 95% 节距,并在中点处分为两截。

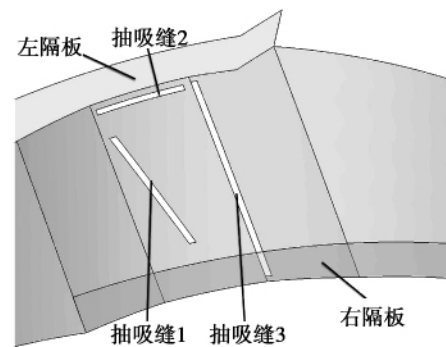


图 2 轮毂面抽吸缝位置

Fig. 2 Slot positions on hub

表 2 给出了本文研究的不同轮毂组合抽吸方案时 3 个抽吸缝的开闭情况。在方案 1 中,开启抽吸缝 1、抽吸缝 2,而抽吸缝 3 开启靠近右隔板的那一半;方案 2 与方案 1 相似,只是抽吸缝 3 全部开启;方案 3 则关闭了抽吸缝 2,抽吸缝 1 和抽吸缝 3 全部开启。由于在尝试的过程中,逐渐确定了 3 个抽吸缝的作用,并且只有抽吸缝 3 存在半开的情况,故只给出了 3 种组合方案。

表 2 3 种组合抽吸方案

Tab. 2 Three schemes of combined suction

组合方案	抽吸缝 1	抽吸缝 2	抽吸缝 3
方案 1	开	开	半开
方案 2	开	开	开
方案 3	开	关	开

#### 1.2 计算网格

考虑到流动周期性及计算效率,只对旋转冲压压缩转子轮缘的一个进气流道进行了数值模拟。图 3 给出了旋转冲压压缩转子的计算域和计算网格。为了获得高质量的网格,在旋转冲压压缩转子网格

划分时进行了分区处理以方便结构化网格的划分。旋转冲压压缩转子进气流道区域周向×径向×节距方向的网格点数分别为 388×40×90,进、出口延伸段轴向分别布置 30 和 40 个网格节点,旋转冲压压缩转子计算模型的网格总数约为 170 万。此外,在网格划分时对旋转冲压压缩转子近壁面区进行了适当加密来准确捕获旋转冲压压缩转子壁面附近的流动情况。

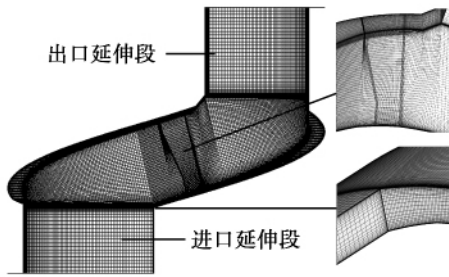


图 3 计算域和计算网格

Fig. 3 Computational domain and computational grid

### 1.3 计算方法及边界条件

数值计算采用 Fluent 软件,求解三维定常时均 Navier-Stokes 方程,湍流模型选取 Spalart-Allmaras(S-A 模型)一方程模型,选用隐式耦合求解算法,方程对流项采用二阶迎风格式离散。进口总压为 101 325 Pa,总温为 288.15 K,进气方向给定,出口给定静压,进出口延伸段左右侧壁面设置为旋转周期性边界,其余为壁面边界条件,绝热无滑移。

文献[17]通过对超声速进气道、Rotor37 及安装翼刀的跨音速压气机的数值计算,验证了其采用的计算方法在超声速可压缩流场数值模拟中可较好地捕捉激波系和气流分离现象;同时,文献[17]还以旋转冲压压缩转子为例,进行了网格数、加密程度对计算精度的考察,划分网格时对机匣、轮毂及隔板附近进行加密,指出网格数大于 77 万时,可以较为清晰地捕捉到结尾激波结构。本文采用的计算模型、网格划分方式及计算方法在上述文献中均已验证,故数值方法是可靠的。

## 2 计算结果及分析

为了后续分析方便,将常规叶轮机械中  $S_1$ 、 $S_2$  流面概念引入旋转冲压压缩转子中,并将右侧隔板到

左侧隔板的方 向定义为节距方向。 $S_1$ 、 $S_2$  流面的示意图如图 4 所示。

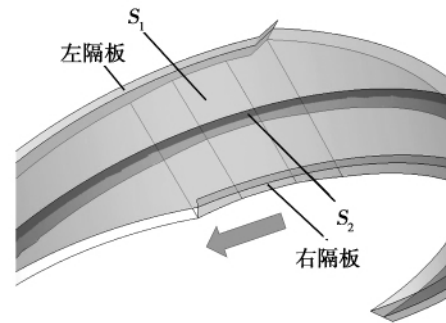


图 4  $S_1$  和  $S_2$  流面的定义

Fig. 4 Definition of  $S_1$  and  $S_2$

此外,抽吸量的大小通过抽吸率来衡量,抽吸率定义为抽吸量与旋转冲压压缩转子进口流量之比的百分数。为了保证未抽吸工况与抽吸工况的可比性,各算例计算中均把 50% 节距  $S_2$  流面中结尾激波推至喉部出口附近。

### 2.1 无抽吸时旋转冲压压缩转子流场分析

图 5 和图 6 分别给出了旋转冲压压缩转子 10%、30%、50%、70% 和 90% 节距  $S_2$  流面相对马赫数分布图和轮毂壁面极限流线图,为了更加方便地观察各节距  $S_2$  流面云图以及轮毂壁面极限流线,隐去了左右隔板。从图 5 中可以看到,A 区域轮毂壁面附近存在明显的低速区,而 B 处气流由于距离出口近,受高出口背压的影响,回流区域沿径向已占据了大部分流道,10%、30%、50% 和 70% 节距处,扩压段位置均存在激波串;而从轮毂壁面极限流线分布可以看出,如图 6 所示,分离情况十分复杂,轮毂壁面存在几条比较明显的分离线及再附线,气流在左侧隔板喉部进口 C 处位置,最先发生分离,一部分气流卷起,在左隔板附近形成回流区,还有一部分则发生偏转,喉部中段存在明显的分离泡,A、B 分别为其分离线、再附线,喉部出口从右侧隔板处到 50% 节距附近存在分离线,如图 6 中 D 处位置,分离线左右两端附近各存在一个螺旋点 E 点和 F 点,在分离线 D 以及再附线 G 之间,存在严重的回流,并且在靠近右隔板区域出现了复杂的分离再附结构。

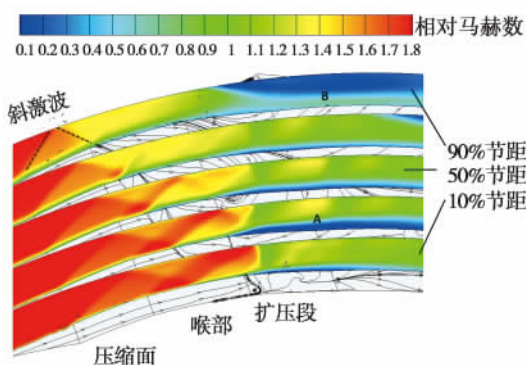


图 5 未抽吸时各节距  $S_2$  流面相对马赫数分布

Fig. 5 Relative Mach number distribution of  $S_2$  at different pitch without suction

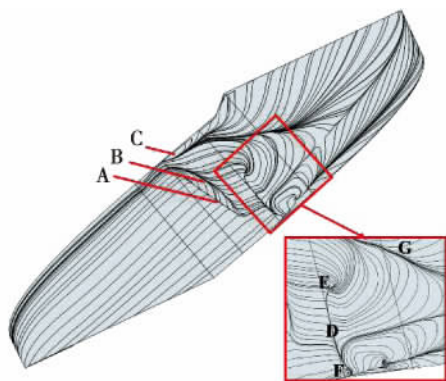


图 6 未抽吸时轮毂壁面极限流线分布

Fig. 6 Limiting streamlines of hub without suction

图 7 给出了旋转冲压压缩转子喉部和扩压段轮毂附近的体流线分布情况, 流线颜色表示相对马赫数。可以看出, A 处发生分离后, 影响范围逐渐扩大, 并且一直延伸到出口; 喉部 C 处分离泡尺度不大, 并且向右隔板偏转; D 处的气流分离主要由两部分构成, 一是 A 处发生偏转的一部分气流, 二是 C 处的再附气流; 在靠近右隔板 B 处, 气流进入扩压段后分离, 产生了小尺度的旋涡结构, 之后与 D 处的大分离相互卷吸, 尺度逐渐加大。

究其原因, 是靠近左侧隔板附近的气流由于沿程损失以及出口背压的影响, 在进入压缩面后附面层就明显增厚, 经过前两道斜激波 (图 5 中虚线位置) 进入喉部之后产生分离, 并且由于背压的影响, 气流强烈掺混, 并逐渐向机匣处发展, 形成大面积低速区, 这部分流道 (90% 节距附近) 的结尾激波基本消

失, 气流在喉部及以后区域并未受到结尾激波的强烈扰动, 而是由于受到出口背压的影响发生了横向流动; 右侧隔板附近气流在进入喉部之前流动距离相对较短, 附面层积累的厚度较小, 但是这部分流道由于结尾激波强度较大, 受到激波附面层强烈的干涉作用以及激波前后的强逆压梯度, 气流发生分离, 并与左隔板至 50% 节距处的横向流动相互挤压, 卷起后随主流向下游流走; 在第一道反射激波的作用下, 喉部中间形成了分离泡, 此处气流再附后受分离泡内部流动的影响, 稍微向右隔板方向偏转, 再加上前文所述的横向流动, 导致了大量低能流体在扩压段后堆积, 如图 7 红框 D 所示, 并且在结尾激波的强烈扰动下分离范围逐步扩大, 形成了喉部之后的高损区。

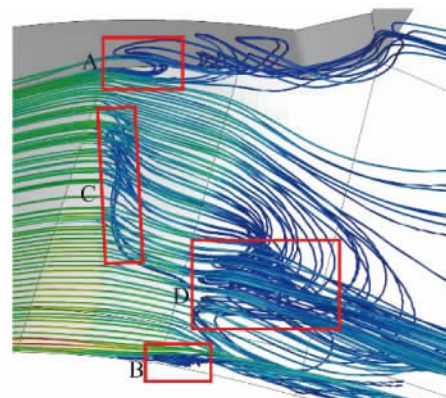


图 7 未抽吸时喉部和扩压段轮毂附近体流线分布

Fig. 7 Flow field structure near hub without suction

根据壁面极限流线以及体流线, 我们大致了解了转子内部流动情况以及气流分离的原因, 故在 3 个位置开启了抽吸缝。其中, 抽吸缝 1 的开启主要是为了消除喉部分离泡, 抽吸缝 2 则期望可以对左隔板角区分离进行控制, 抽吸缝 3 位于喉部出口, 其开启的目的是推迟或削弱扩压段位置的大范围气流分离。

### 2.2 抽吸时旋转冲压压缩转子性能与流场分析

从表 3 可以看出, 3 种轮毂组合抽吸方案对旋转冲压压缩转子性能均有影响。当抽吸率为 2% 时, 相对于无抽吸时, 采用抽吸方案 1, 旋转冲压压缩转子总压比提升 4.2%, 但是效率下降了 1.1%;

采用抽吸方案 2 时,旋转冲压压缩转子在效率几乎不变的条件下,总压比提高 5.2%;而采用抽吸方案 3 时,旋转冲压压缩转子可以在总压比几乎不变的条件下,效率提高 1.1%。因此,除了抽吸方案 1 会导致效率有一定程度降低外,其它两种抽吸方案均对旋转冲压压缩转子的性能有一定的提升作用。

表 3 不同抽吸方案下旋转冲压压缩转子性能参数

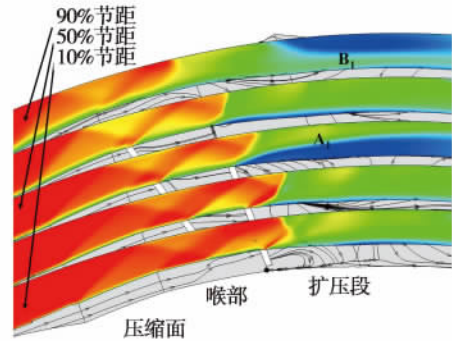
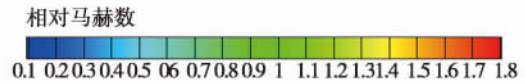
Tab. 3 Performance parameters of the ram-rotor

组合方案	抽吸率/%	压比	效率	压比变化/%	效率变化/%
原 型	0	2.863	0.757	0	0
方案 1	2	2.982	0.749	4.2	-1.1
方案 2	2	3.013	0.758	5.2	0.1
方案 3	2	2.866	0.765	0.1	1.1

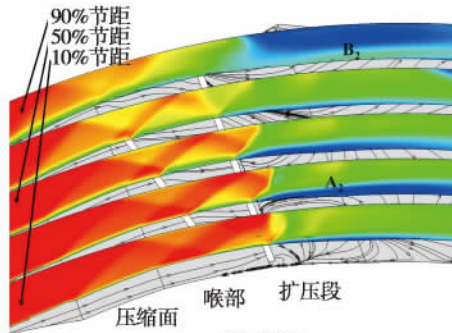
图 8 给出了 3 种抽吸方案时,旋转冲压压缩转子 10%、30%、50%、70% 和 90% 节距处  $S_2$  流面相对马赫数分布。从图中可以看出,每个抽吸方案下,不同节距的激波结构虽然和无抽吸时较为相似,但依然存在差别。抽吸缝 2 的抽吸作用增强了 90% 节距处流道的扩压能力,但其扩压效果依然无法等同于其它节距,并且对 B 处低速区的控制效果也不显著;抽吸缝 1 很好地消除了近壁面附面层低能流体,抽吸缝 3 的抽吸效果有二,一是改变了轮毂壁面附近低速区的位置,二是使结尾激波变得清晰。

从图 8(a) 可以看出,采取抽吸方案 1 后,近轮毂壁面低速区移动至 50% 节距处 ( $A_1$  位置),径向影响范围扩大,同时,抽吸缝 2 的抽吸效果显著,90% 节距处激波结构向后发展,这意味着抗压能力增强,并且低速区  $B_1$  的范围相比无抽吸时也有所减小。方案 2 与方案 1 相比,增加了抽吸缝 3 的长度,在总抽吸率不变的情况下,抽吸缝 2 的抽吸率下降而抽吸缝 3 抽吸率上升;从图 8(b) 中看出,与方案 1 相比低速区  $B_2$  的范围增大,90% 节距  $S_2$  流面激波结构前移,这说明抽吸缝 2 的抽吸效果减弱,与无抽吸时相比,低速区  $A_2$ 、 $B_2$  的分布位置与影响范围大致相似,只是每个节距的增压能力均有所提高;从图 8(c) 发现,与前两种组合抽吸方式相比,抽吸方案 3 对轮毂壁面附近流动改善效果最佳,低速区  $A_3$  基本消失,由于抽吸缝 2 的关闭,低速区  $B_3$  的影响范围明显增大,已经扩展到 70% 节距处流道,旋转冲压

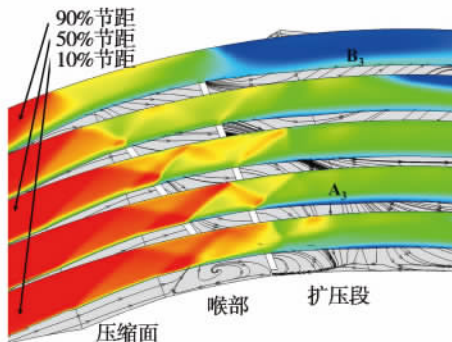
压缩转子 90% 节距处的激波结构与无抽吸时基本一致,激波系即将被推入压缩段,压比无法得到提升。



(a) 方案1



(b) 方案2



(c) 方案3

图 8 各抽吸方案下个节距  $S_2$  流面相对马赫数分布

Fig. 8 Relative Mach number contour of  $S_2$  at each pitch with suction

对比 3 种组合抽吸的结果,可以发现抽吸缝 2 的开启可以明显提高旋转冲压压缩转子的压比。解释这个现象,需要先把旋转冲压压缩转子不同节距

的流道分别想象成单个二维进气道。反压增大时激波串起始位置不断向上游移动,抗反压能力降低,而在旋转冲压压缩转子中,不同节距流道距离转子出口的远近决定了其受出口反压影响的程度,显然 90% 节距处受到的影响比较大,故这个位置的激波结构比其它位置更靠近上游,抗反压能力弱,其激波结构的失稳会影响到其它节距,引起旋转冲压压缩转子失速,可以认为靠近左侧隔板处流道的抗反压能力决定了整个旋转冲压压缩转子的压比。无抽吸时 90% 节距  $S_2$  流面的激波结构已经接近了极限背压工况,如图 5 所示,激波系即将被推出流道,而开启抽吸缝 2 后,90% 节距  $S_2$  流面的激波数目变多,如图 8(a)、图 8(b) 所示,气流掺混区后移,抗反压能力加强,故方案 1、方案 2 的压比得到了较大的提高,而方案 3 中关闭了抽吸缝 2,90% 节距处的激波结构相比原型基本一致,如图 8(c) 所示,且出口附近的低速区还有所加大,压比无法提升。

图 9 给出了 3 种抽吸方案时,旋转冲压压缩转子轮毂壁面极限流线分布情况。可以看出,抽吸缝 1 可以吸除低能流体,改善喉部流动,而扩压段后的流动则比较复杂。由图 9(a) 可知,采取抽吸方案 1 后,分离泡 ( $A_1$  处) 尺度得到削弱,左隔板附近  $C_1$  处的气流分离被有效控制,分离线  $D_1$  后移,无抽吸时靠近分离线  $D$  之后的近轮毂壁面低速区域移动至流道中部 ( $D_1$  位置),并在  $H_1$  位置出现新的分离线;由图 9(b) 可知,方案 2 中加长了抽吸缝 3,意图改善无抽吸时,如图 6 所示,分离线  $D$  与再附线  $G$  之间的横向流动,但从计算结果来看,对横向流动的抑制效果不明显,分离线  $D_2$  以及螺旋点  $E_2$ 、 $F_2$  移至抽吸缝后,其扩压段壁面的分离形式与无抽吸时相比差异不大,在抽吸缝 1 与抽吸缝 2 的作用下,喉部流动(位置  $A_2$ 、 $C_2$ ) 得到改善;从图 9(c) 可知,关闭抽吸缝 2 的直接后果就是  $C_3$  位置附近分离区的范围有所加大,但由于抽吸缝 3 将附近低能流体有效吸除后,扩压段的分离形式得到简化,奇点数目减少,只存在比较明显的横向流动,与无抽吸时相比,更多的低能流体发生偏转堆积到右隔板 ( $H_3$  位置) 附近,并与角区分离涡相互卷吸,加大了角区分离的范围,螺旋点  $F_3$  移动到喉部。

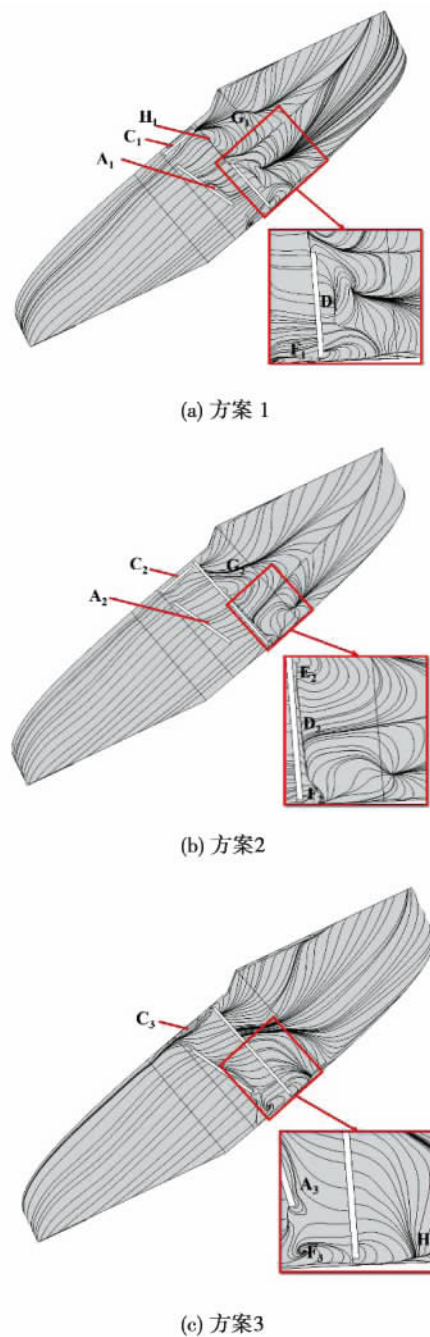


图 9 各抽吸方案下轮毂壁面极限流线分布  
Fig. 9 Limiting streamlines of hub with suction

图 10 给出了 3 种抽吸方案时,旋转冲压压缩转子喉部和扩压段轮毂附近的体流线分布情况,可以看出,抽吸作用使流场结构发生了明显的变化。方案 1 中,如图 10(a) 所示,  $A_1$  处气流受到抽吸的影响,流动加快,喉部流动状况有所改善,在进入扩压段后,受到出口背压的影响,气流直接发生分离,而距离左隔板稍远的气流受到的影响相对较弱,只是发

生了横向偏转,在抽吸缝 1、抽吸缝 3 的抽吸作用下,  $C_1$  位置附近气流动能较大, 当其与偏转气流相遇, 会限制偏转气流向右隔板方向流动, 故气流分离集中在了  $D_1$  区域,  $B_1$  处气流则受到强逆压梯度的影响, 角区附面层分离形成旋涡; 采用抽吸方案 2 后, 如图 10(b) 所示, 抽吸缝 2 的流量下降, 抽吸效果变差,  $A_2$  区域回流加剧, 并且由于抽吸缝 2 与抽吸缝 3 位置比较接近, 两者相互影响, 造成  $A_2$  以及其后气体流动比较混乱,  $C_2$  附近气流相比方案 1 时动能变小, 故与偏转气流相遇后互相掺混, 占据了右半部分流道 ( $D_2$  区域),  $B_2$  处旋涡流动被  $D_2$  区域气流耗散, 影响范围减小, 并且随着这部分气流卷起流走; 鉴于抽吸缝 2 与抽吸缝 3 相互影响, 在抽吸方案 3 中, 关闭了抽吸缝 2, 在总抽吸量一致的情况下, 抽吸缝 3 的抽吸量提高了约 0.5%, 从图 10(c) 看出,  $A_3$  区域分离起始位置已经前移至喉部进口, 更加接近于无抽吸时的情况, 主流区靠近左隔板的区域的气流在经过抽吸缝 3 后仍保持较大的流速, 没有因为出口背压的影响发生偏转, 而在主流区靠近右隔板处, 气流偏转并与  $B_3$  区域旋涡掺混, 卷起后随主流流走, 气流在右隔板处 ( $B_3$  区域) 的堆积又阻碍了旋涡区域向后发展, 导致其向喉部及叶高方向流动, 恶化了流场。

图 11、图 12 分别给出了旋转冲压压缩转子扩压段出口处以及转子出口处周向平均熵值的径向分布曲线。从图 11 可知, 在方案 1、方案 2 中, 由于抽吸缝 2 抽吸对左隔板附近回流的抑制作用, 使其在近轮毂面区域气流损失略有下降, 而方案 3 损失的下降则得益于扩压段大分离的消失; 从约 30% 隔板高度开始, 各组合方式的损失较未抽吸时均开始变大, 显然对于方案 1、方案 2 其主要原因是流道中部流动的恶化, 而对于方案 3 其熵值升高则是由于左隔板回流严重; 方案 3 受到两侧隔板处回流的影响, 其高熵值区域一直延伸到机匣, 方案 2 虽然开启了抽吸缝 2, 但由于流量较小, 外加与抽吸缝 3 抽吸效果相互制约, 其对左隔板回流的抑制作用远小于方案 1, 故在靠近机匣处, 方案 1 的损失最小。

由图 12 可知, 方案 1、方案 2 熵值曲线的走势相似, 其在轮毂及机匣附近损失变小, 这主要是由于抽吸缝 2 的抽吸作用, 使回流区提升到靠近机匣位

置, 并且尺度减小的缘故, 而主流区损失较大, 则是其扩压段分离影响的延续; 对于方案 3, 由于扩压段分离的消失, 使得扩压段后气流流动状况得到改善, 故从轮毂到 60% 隔板高度处熵值均与未抽吸时相当, 同样, 由于没有在左隔板处进行抽吸, 在 60% 隔板高度以上受回流区影响严重, 损失较大。

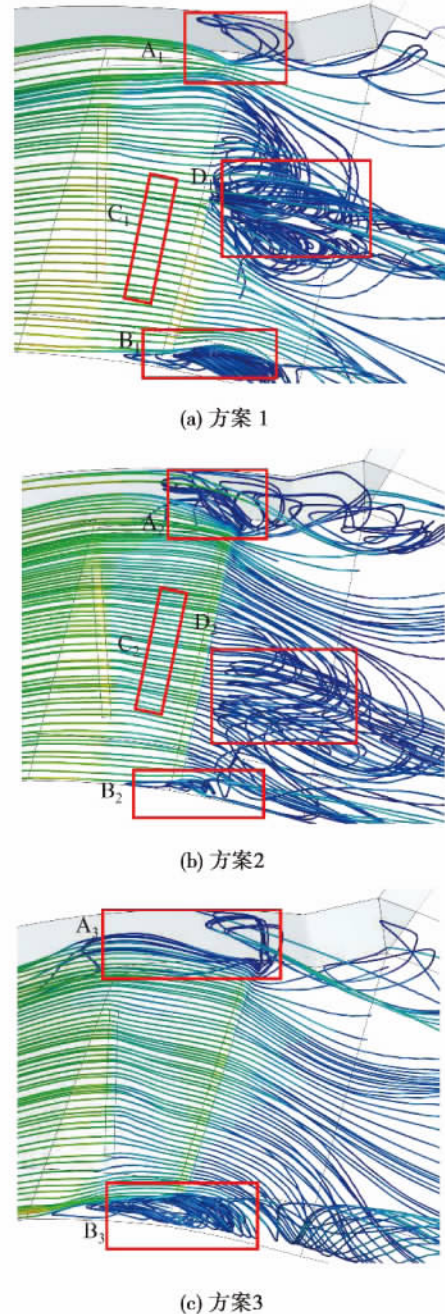


图 10 各抽吸方案下旋转冲压压缩转子喉部和扩压段轮毂附近的体流线分布

Fig. 10 Flow field structure near hub with suction

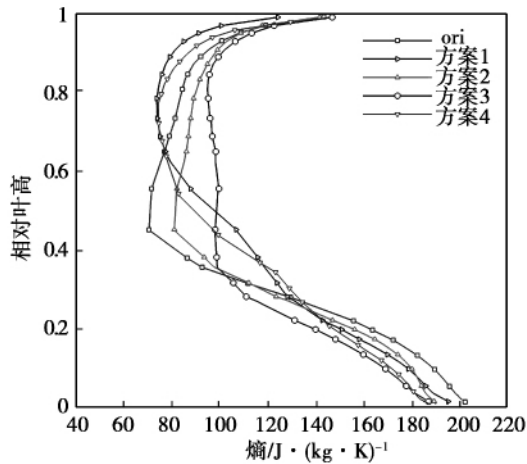


图 11 扩压段出口处周向平均熵值的径向分布  
Fig. 11 Radial distribution of the entropy at the diffuser exit

由前文可知, 旋转冲压压缩转子效率的提高一方面归功于低能流体的吸除, 而另一方面可能是抽吸之后旋转冲压压缩转子扩压段后流动的改善。

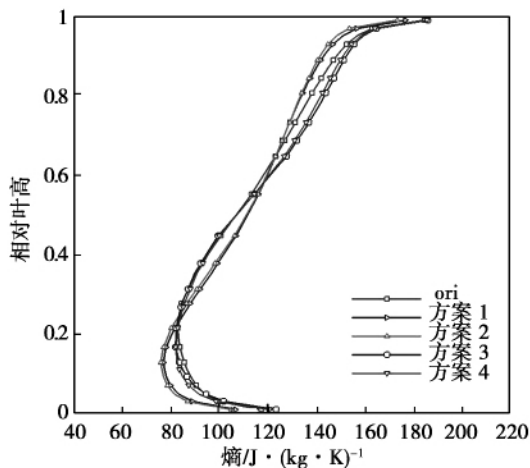


图 12 转子出口处周向平均熵值的径向分布  
Fig. 12 Radial distribution of the entropy at rotor outlet

### 2.3 抽吸流量对抽吸效果的影响分析

图 13、图 14 分别给出了抽吸方案 3 不同组合抽吸量抽吸时, 旋转冲压压缩转子等熵绝热效率、压比的变化曲线。未抽吸时旋转冲压压缩转子的效率、压比分别为 0.757、2.863, 即图中虚线所示; 两图中, 横坐标均表示抽吸缝 3 的抽吸率, 曲线 0.5、曲线 1.0 分别代表抽吸缝 1 的抽吸率为 0.5%、1.0%。由图 13 可知, 不同组合抽吸量抽吸时均能

提高旋转冲压压缩转子的效率, 并且当抽吸缝 1 抽吸量不变时, 旋转冲压压缩转子绝热效率随抽吸缝 3 抽吸量的增加, 先增大后减小, 效率最高提高了 1.1%, 抽吸缝 1 抽吸量的变化对效率影响不显著; 从图 14 看出, 压比的变化规律与等熵绝热效率相反, 其随着抽吸量的增加而有所下降, 但变化幅度不大。综合压比和效率变化曲线, 在抽吸缝 1 抽吸率为 0.5%、抽吸缝 3 抽吸率为 1.5% 时, 可以在压比不下降的情况下, 提高效率。

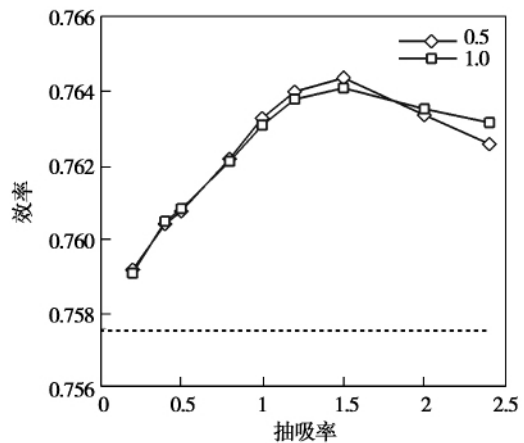


图 13 效率随抽吸率变化  
Fig. 13 Effect of the suction flow rate on efficiency

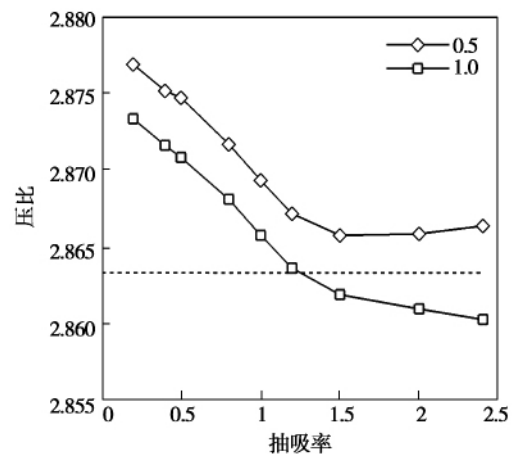


图 14 压比随抽吸率变化  
Fig. 14 Effect of the suction flow rate on pressure ratio

图 15 给出了 3 种抽吸率下, 轮毂壁面的极限流线分布, 通过给定不同的组合抽吸率, 研究抽吸流量对旋转冲压压缩转子内部流场结构的影响。图 15 (a) 表示抽吸缝 1 抽吸率为 0.5%、抽吸缝 3 抽吸率



为 0.2% 时的极限流线分布,可以看出抽吸缝 3 抽吸率较小时,扩压段后依然存在大量低能流体,在抽吸缝后(图中方框位置)便发生分离,在流道中部靠近左隔板位置出现了一个螺旋点 N;增加抽吸缝 3 抽吸率后,即图 15(b),抽吸缝 1 的抽吸率不变,而抽吸缝 3 抽吸率达到 1.5%,抽吸缝后的分离线消失,螺旋点也消失,气流在流道中部没有分离,但是抽吸缝 1 的抽吸效果略微变差;当抽吸缝 1 抽吸率达到 1.0%、抽吸缝 3 抽吸率为 1.5% 时如图 15(c) 所示,对比图 15(b) 和图 15(c) 得出,增加抽吸缝 1 的抽吸量对扩压段流动几乎没有影响,其主要作用是消除喉部分离泡,可以看到,随着抽吸缝 1 抽吸流量增加,抽吸缝后流动变得接近流向,但由于喉部分离泡本身的尺度很小,虽然分离泡得到进一步控制,但是并不能有效提升效率。

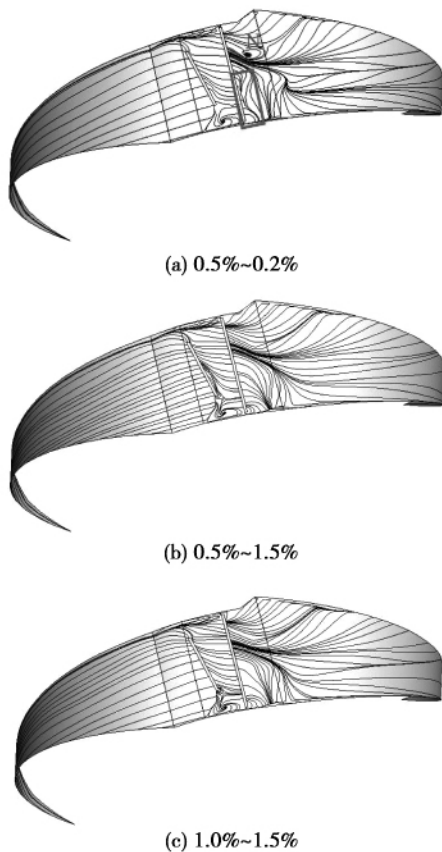


图 15 不同抽吸率下轮毂壁面极限流线分布  
Fig. 15 Limiting streamlines of hub with different suction flow rates in case 3

在方案 3 这种组合方式下,加大抽吸量并不能有效提升压比,反而会使其下降,这是由组合方式决

定的;改变抽吸缝 1 的抽吸量对旋转冲压压缩转子的性能参数影响较小;通过加大抽吸缝 3 的抽吸量,可以减少喉部出口及其以后流场低能流体,提升效率,达到一定抽吸量时,效率增长幅度下降。

### 3 结 论

(1) 抽吸缝 1 在 3 种抽吸方案中均起到很好的控制喉部分离泡的作用;在方案 1、方案 2 中,抽吸缝 2 在抑制左隔板附近回流、提高压比方面起到了很好的作用,压比分别提高了 4.2%、5.2%;而在方案 3 中,抽吸缝 1 以及全开的抽吸缝 3 有效减弱了扩压段分离,使其效率上升了 1.1%。综合来看,方案 2、方案 3 的对性能参数均有提升,但由于方案 2 中间节距处流动比较混乱,并且抽吸缝之间会相互影响,故方案 3 在三者之中最佳;

(2) 在方案 3 组合抽吸方式下,加大抽吸缝 1 的抽吸量可以削弱分离泡造成的横向流动,改善喉部流场,效率基本不变而压比会下降;增加抽吸缝 3 抽吸量,加强了旋转冲压压缩转子流道的流通能力,扩压段流动得到改善,虽然压比有所下降,但是效率提高;

(3) 附面层抽吸改变了左隔板附近流道激波系结构,此处流道激波数目增多,起到了提高压比的作用。而损失下降的原因可能有两点:一是吸除低能高熵流体;二是改善近轮毂壁面处流动,减少了扩压段后主流流动损失。

虽然附面层抽吸改变了旋转冲压压缩转子的激波结构及壁面流谱,实现了总压比及效率的改善,但是只能实现单一性能参数的提高。为了进一步控制左隔板附近回流以及轮毂壁面气流分离,实现压比、效率的同时提高,需要深入研究左隔板回流与扩压段轮毂壁面分离的内在联系,找出更合理的抽吸位置和抽吸量,并注意各抽吸缝之间的相互匹配。此外,隔板位置也可以采取附面层抽吸措施,并且通过合理组合,找到最佳的组合方式,这将是下一步的研究重点。

#### 参考文献:

[1] DE VIASI V. 485 kW turbine rated 35% simple cycle at 1700 f firing temperature[J]. Gas Turbine World 2002, 32(5): 13 - 16.  
[2] LAWLOR S P, HINKEY J B, MACKIN S G, et al. supersonic com-

- pression stage design and test results [R]. ASME 2004 - IMECE - 59914.
- [3] STEELE R ,BALDWIN P ,KESSELI J. insertion of shock wave compression technology into micro turbines for increased efficiency and reduced costs[R]. ASME - 2005 - GT - 68203.
- [4] LAWLOR S P ,BALDWIN P. Conceptual Design of a Supersonic CO<sub>2</sub> Compressor[R]. ASME 2005 - GT - 68349.
- [5] A. D. GROSVENOR ,P. M. BROWN ,S. P. LAWLOR. Design methodology and predicted performance for a supersonic compressor stage [R]. ASME 2006 - GT - 90409.
- [6] GROSVENOR A D ,TAYLOR D A ,BUCHER J R ,et al. Measured and predicted performance of a high pressure ratio supersonic compressor rotor[R]. ASME 2008 - GT - 50150.
- [7] 肖 翔 ,赵晓路 ,徐建中. 高压比旋转冲压叶轮研究[J]. 工程热物理学报 2009 29(5) : 759 - 762.  
XIAO Xiang ,ZHAO Xiao-lu ,XU Jian-zhong. A new kind of high performance shock-in impeller[J]. Journal of Engineering Thermophysics 2009 29(5) :759 - 762.
- [8] 肖 翔 ,刘锡阳 ,赵晓路 等. 对转冲压压气机冲压叶栅实验研究[J]. 工程热物理学报 2009 30 (11) : 1837 - 1840.  
XIAO Xiang ,LIU Xi-yang ,ZHAO Xiao-lu ,et al. The cascade experimental investigation of counter-rotating ram-pressor [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2009 30(11) :1837 - 1840.
- [9] 孙小磊 ,扈延林 ,杜建一 等. 来流气流角变化对冲压叶栅性能的影响[J]. 工程热物理学报 2010 31(9) :1484 - 1487.  
SUN Xiao-lei ,HU Yan-lin ,DU Jian-yi ,et al. Influence of flow angle on the supersonic cascade performance [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2010 31(9) :1484 - 1487.
- [10] 于达仁 ,何保成 ,吕晓武 等. 旋转冲压发动机进气道压比特性分析[J]. 推进技术 2008 29(3) : 329 - 333.  
YU Da-ren ,HE Bao-cheng ,LV Xiao-wu ,et al. Characteristics analysis of pressure ratios for rotated ramjet inlets [J] Journal of Propulsion Technology 2008 29(3) : 329 - 333.
- [11] 亢维佳 ,刘占生 ,张广辉 等. 背压脉动作用下旋转冲压转子进气道流场激励特性[J]. 推进技术 2013 ,34 (07) : 880 - 889.  
KANG Wei-jia ,LIU Zhan-sheng ,ZHANG Guang-hui ,et al. Flow excitation characteristics of rampressor inlet under back pressure pulsation [J]. Journal of Propulsion Technology. 2013 ,34 (07) : 880 - 889.
- [12] 亢维佳 ,刘占生 ,卢江波 等. 转子涡动对旋转冲压转子进气道起动及性能的影响[J]. 推进技术 2014 ,35 (10) : 1333 - 1341.  
KANG Wei-jia ,LIU Zhan-sheng ,LU Jiang-bo ,et al. Effects of rotor whirl on starting ability and flow performance of rampressor rotor inlet [J]. Journal of Propulsion Technology. 2014 ,35 (10) : 1333 - 1341.
- [13] 韩吉昂. 旋转冲压压缩转子进气道数值仿真及性能研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学 2009.  
HAN Ji-ang. Numerical simulation and performance research of flow path in a ram-rotor [D]. Harbin Institute of Technology 2009.
- [14] 韩吉昂 ,严红明 ,钟兢军 等. 旋转冲压压缩转子二维进气道数值研究[J]. 航空动力学报 2008 23(6) : 1054 - 1060.  
HAN Ji-ang ,YAN Hong-ming ,ZHONG Jing-jun ,et al. Numerical research of two-dimensional flow-path in ram-rotor [J]. 2008 28 (06) :1054 - 1060.
- [15] 韩吉昂 ,钟兢军 ,严红明 等. 旋转冲压压缩转子三维进气道数值研究[J]. 航空动力学报 2009 24(5) : 1079 - 1088.  
HAN Ji-ang ,ZHONG Jing-jun ,YAN Hong-ming ,et al. Numerical research of three dimensional flow-path in a ram-rotor [J]. Journal of Aerospace Power 2009 24(05) :1079 - 1088.
- [16] HAN Ji-ang ,ZHONG Jing-jun ,PAN Zhen-sheng ,et al. Effect of tip clearance size on the ram-rotor performance [R]. ASME 2014 - GT - 26084.
- [17] 杨 凌. 旋转冲压压缩转子结构与性能研究[D]. 大连:大连海事大学 2011.  
YANG Ling. Structure and performance research on ram-rotor and scrampressor [D]. Dalian. Dalian Maritime University 2011.
- [18] 杨 凌 ,钟兢军 ,韩吉昂 等. 关键几何参数对旋转冲压压缩转子流场及性能影响研究 [J]. 工程热物理学报 2012 ,33 (03) : 388 - 392.  
YANG Ling ,ZHONG Jing-jun ,HAN Ji-ang ,et al. Influence of the two geometric parameters on ram-rotor flow field and performance [J]. Journal Of Engineering Thermophysics 2012 33 (03) :388 - 392.
- [19] 钟兢军 ,韩吉昂 ,杨 凌 等. 旋转冲压压缩转子研究进展及发展前景[J]. 航空动力学报 2011 26(10) : 2293 - 2301.  
ZHONG Jing-jun ,HAN Ji-ang ,YANG Ling ,etal. Research progress and development prospects of the ramrotor [J]. Journal of Aerospace Power 2011 26(10) :2293 - 2301.
- [20] 扈延林 ,孙小磊 ,唐 菲 等. 冲压转子流场和轮毂抽吸处理分析[J]. 工程热物理学报 2011 32(7) :759 - 762.  
HU Yan-lin ,SUN Xiao-lei ,TANG Fei ,et al. Analysis of flow field and hub suction in ramrotor [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2011 32(7) :1111 - 1114.
- [21] 扈延林 ,唐 菲 ,赵庆军 等. 冲压叶栅边界层抽吸处理分析 [J]. 推进技术 2012 33(3) : 356 - 362.  
HU Yan-lin ,TANG Fei ,ZHAO Qing-jun ,et al. Numerical investigation on the effects of boundary layer suction in a ramrotor cascade [J]. Journal of Propulsion Technology 2012 33(03) :356 - 362.
- [22] 韦 狄. 附面层抽吸位置对旋转冲压压缩转子影响研究 [D]. 大连:大连海事大学 2013.  
WEI Di. Research of influence of boundary layer suction position on ram-rotor [D]. Dalian Maritime University 2013.

( 单丽华 编辑)

boundary vorticity flux ,blade leading edge ,micro-cylinder

轮毂组合抽吸对旋转冲压压缩转子性能的影响 = **Effects of Hub Combined Boundary Layer Suction on the Performance of a Ram-rotor** [刊 ,汉] HAN Ji-ang ,XUE Jia-qi ,ZHONG Jing-jun ,GUAN Jian ( Marine Engineering College ,Dalian Maritime University ,Dalian 116026 ,China) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(12). - 38 ~47

In order to improve the flow structure of the ram-rotor passage and the aerodynamic performance of ram-rotor ,Fluent software was used to simulate the overall performance and flow characteristics of the ram-rotor ,and the influence of suction flow rate on performance of ram-rotor was discussed. The results show that: three schemes of combined suction on hub can improve the flow field of ram-rotor ,and the efficiency or pressure ratio. In Case 2 ,the loading capacity of the ram-rotor is improved significantly ,and the pressure ratio increases by 5.2% . In Case 3 ,the boundary layer separation of the ram-rotor passage is controlled effectively ,and the efficiency increases by 1.1% almost without changing pressure ratio. The influence of suction flow rate on performance of the ram-rotor is not evident. **Key words**:ram-rotor ,combined boundary layer suction ,performance ,numerical simulation

热电联产集中供热方案的分析对比 = **Analysis and Comparison of Cogeneration Heating Schemes** [刊 ,汉] ZHAO Chong ,LUO Xiang-long ,CHEN Ying ,SONG Meng-jie ,WANG Chao ( School of Material and Energy ,Guangdong University of Technology ,Guangzhou ,Guangdong ,China ,Post Code: 510006) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(12). - 48 ~55

District heating is the current trend in the field of heating. In order to improve the energy efficiency of heating system ,and reduce heating costs ,this paper put forward four kinds of nature gas district heating schemes based on the different heating modes of existing power plant. The four cogeneration heating schemes were modeled and simulated using Cycle-Tempo. The efficiencies of energy and exergy of each system were analyzed. The main factors influencing the efficiencies of energy and exergy were discussed from the interior of each system. Then this paper established the heating economic model for each scheme and analyzed the main factors affecting the economy. Finally , the influence of the nature gas price ,the power price ,the heating load and the heating distance on the cogeneration heating systems were discussed. **Key words**:cogeneration heating ,simulation ,thermodynamic ,economic ,comparison

火电厂 WFGD 中石膏旋流器节能降耗分析——中心棒的影响 = **Energy Saving of Gypsum Cyclone of Wet Flue Gas Desulfurization in Power Plant by Central Solid Rod** [刊 ,汉] YANG Yang ( School of Power Engi-